



# APPROCHE FIABILISTE DANS UN CONTEXTE CEM. EXEMPLE D'APPLICATION

Mourad Larbi, Philippe Besnier, Bernard Pecqueux

## ► To cite this version:

Mourad Larbi, Philippe Besnier, Bernard Pecqueux. APPROCHE FIABILISTE DANS UN CONTEXTE CEM. EXEMPLE D'APPLICATION. Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ElectroMagnétique (CEM2014), Jul 2014, Clermont-Ferrand, France. hal-01080724

**HAL Id: hal-01080724**

**<https://hal.science/hal-01080724>**

Submitted on 6 Nov 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## APPROCHE FIABILISTE DANS UN CONTEXTE CEM. EXEMPLE D'APPLICATION

M. Larbi<sup>1,2</sup>, P. Besnier<sup>1</sup>, B. Pecqueux<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IETR UMR CNRS 6164 – INSA de Rennes, Département Antennes et Dispositifs Hyperfréquences  
20 Av. des Buttes de Coësmes 35043 Rennes, France, mourad.larbi@insa-rennes.fr  
<sup>2</sup> CEA, DAM, GRAMAT, F-46500 Gramat, France, bernard.pecqueux@cea.fr

**Résumé.** Cette communication propose de traiter une analyse de risque d'un défaut CEM par des méthodes de fiabilité issue de la mécanique probabiliste. Un calcul d'une *probabilité de défaillance* (probabilité de dépassement d'un seuil) d'un courant induit par diaphonie est établi en prenant en compte l'aléa sur les variables d'entrée dans l'hypothèse d'application de la théorie des lignes de transmission. La probabilité de défaillance a été évaluée par les méthodes de fiabilité nécessitant un coût de calcul relativement faible par rapport à la méthode de simulation de type Monte Carlo (MC).

### I. INTRODUCTION

Depuis quelques années, de nombreuses démarches statistiques ont été introduites en CEM. Un intérêt particulier est porté à ces outils en raison de la complexité des phénomènes physiques observés et des nombreuses variables d'entrée imparfaitement définies dont les calculs d'interférence électromagnétique dépendent. Les travaux développés en CEM ces dernières années, ont permis d'obtenir l'espérance et l'écart-type d'un observable dépendant de plusieurs facteurs aléatoires [1]. Toutefois, très peu d'approches statistiques permettent d'approximer les valeurs extrêmes qui sont particulièrement importantes dans le cadre par exemple de l'appréciation d'un risque d'immunité électromagnétique. Ainsi, cette communication traite d'une approche statistique par méthodes de fiabilité (issue de la mécanique probabiliste [2]) pour l'analyse de risque d'un défaut CEM en prenant en compte de l'incertain sur les variables d'entrée influençant les niveaux d'interférence dans le contexte des lignes de transmission.

La démarche que nous adoptons consiste à examiner une situation très simple de couplage électromagnétique, configuration pour laquelle nous cherchons à examiner les valeurs extrêmes d'un courant induit par diaphonie sur une charge d'extrémité. Nous introduisons ensuite les méthodes classiques de fiabilité permettant de quantifier une *probabilité de défaillance* (probabilité de dépassement d'un seuil) associé à ce courant induit. Enfin, nous finirons par présenter et confronter les résultats obtenus par les différentes méthodes de fiabilité.

### II. ENONCE DU PROBLEME

Pour étudier l'impact d'aléas d'entrée sur les interférences électromagnétiques, nous avons considéré un exemple très simple d'une ligne de transmission sans pertes à deux fils au-dessus d'un plan de masse parfaitement conducteur (PEC). Le fil conducteur n°1 est situé à une hauteur  $h_1$  au-dessus du plan de masse en étant alimenté par une force électromotrice  $e = 1$  V. Les deux résistances branchées aux extrémités sont notées  $R_1$  et  $R_2$ . Le fil conducteur n°2 est lui, placé à une hauteur  $h_2$  au-dessus du plan de masse et relié à deux charges aux extrémités, notées  $R_3$  et  $R_4$ . Les deux fils conducteurs ont la même longueur, notée  $Lg$ . Enfin, la distance qui les sépare est notée  $d$ , et les deux fils ont le même diamètre, noté  $d_m$ . Nous nous sommes intéressés au courant induit par diaphonie à l'extrémité opposée sur le fil conducteur n°2, noté  $I_2(Lg)$  dépendant des aléas suivants :

- les résistances  $R_1$  et  $R_4$  varient uniformément entre 1  $\Omega$  et 10  $\Omega$  ;
- les résistances  $R_2$  et  $R_3$  varient uniformément entre 10 k $\Omega$  et 100 k $\Omega$  ;
- les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  varient indépendamment l'une de l'autre avec un aléa uniforme entre 1.5 cm et 2.5 cm ;
- la longueur  $Lg$  des deux fils conducteurs est une variable aléatoire de distribution uniforme entre 9.5 m et 10.5 m.

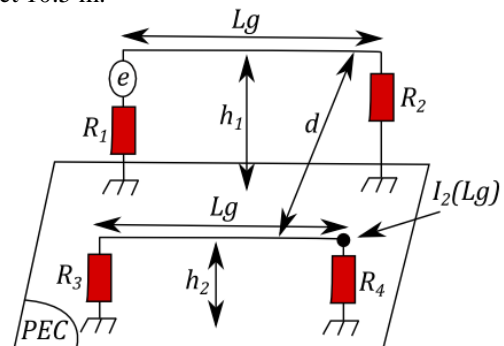


Fig. 1. Ligne de transmission à deux fils conducteurs au-dessus d'un plan de masse parfaitement conducteur (PEC) avec des aléas uniformes sur : les résistances  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , les hauteurs  $h_1, h_2$  et la longueur des fils conducteurs  $Lg$ .

De plus, la distance  $d$  entre les fils conducteurs est fixée à 1 cm et le diamètre  $d_m$  de chaque fil est 1 mm. L'objectif de l'étude est de calculer une probabilité de défaillance  $P_f$  définie comme : une probabilité que le maximum du courant induit évalué sur une bande de fréquence  $\Delta f$  prédéfinie excède un seuil noté  $I_S$ , *i.e.*  $P_f = \mathbb{P}(\max_{\Delta f} I_2(Lg) \geq I_S)$ .

### III. METHODES DE FIABILITE

L'objectif des méthodes de fiabilité est d'évaluer la probabilité de défaillance  $P_f$  d'un système physique par rapport à un scénario de défaillance donné en prenant en compte les incertitudes dans la description du modèle (*e.g.* propriétés géométriques). Le critère de défaillance est représenté mathématiquement par une fonction appelée *fonction d'état-limite*, notée  $g$ , dépendant du vecteur des paramètres d'entrée  $\mathbf{X}$  [3]. Par convention, la fonction d'état-limite est définie par :

$$g : \mathbb{R}^M \rightarrow \mathbb{R} \quad \mathbf{X} \rightarrow y_S - \mathcal{M}(\mathbf{X}) \quad (1)$$

où  $\mathcal{M}$  est le modèle de simulation numérique utilisé,  $y_S$  est un seuil fixé et :

- $D_f = \{\mathbf{x}; g(\mathbf{x}) \leq 0\}$  définit le domaine de défaillance ;
- $D_S = \{\mathbf{x}; g(\mathbf{x}) > 0\}$  définit le domaine de sûreté ;
- $\partial D = \{\mathbf{x}; g(\mathbf{x}) = 0\}$  est la surface d'état-limite.

Ainsi, la probabilité de défaillance est définie comme :

$$P_f = \mathbb{P}(g(\mathbf{x}) \leq 0) = \int_{D_f} f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (2)$$

où  $f_{\mathbf{X}}$  est la densité de probabilité jointe de  $\mathbf{X}$ , vecteur formé de  $M$  variables aléatoires (éventuellement corrélées).

Cependant, l'intégrale définie par la relation (2) est souvent très complexe à calculer car la fonction d'état-limite  $g$  est rarement analytique. Ainsi, des méthodes numériques doivent être utilisées. La méthode de simulation par Monte Carlo (MC) peut être employée pour évaluer cette intégrale mais cela nécessite un nombre important d'appels à la fonction d'état-limite  $g$ , et par conséquent au modèle de simulation numérique  $\mathcal{M}$ . Ainsi, les méthodes FORM et SORM (*First and Second Order Reliability Methods*) ont été introduites pour approximer la probabilité de défaillance en réduisant le coût de calcul du modèle  $\mathcal{M}$  [2].

#### III.1. Méthodes d'approximation FORM-SORM

La méthode FORM commence par reformuler la relation (2) dans l'espace *gaussien centré réduit*, qui est l'espace des variables aléatoires  $\boldsymbol{\xi}$  gaussiennes de moyennes nulles et d'écart types unitaires par l'intermédiaire d'une transformation isoprobabiliste  $T: \mathbf{X} \rightarrow \boldsymbol{\xi}(\mathbf{X})$  (*e.g.*

transformations de Rosenblatt ou Nataf [2]). Les variables aléatoires gaussiennes centrées réduites sont ensuite transformées en variables aléatoires gaussiennes centrées réduites *indépendantes* [2]. En effectuant, le changement de variable, la relation (2) devient :

$$P_f = \int_{g(T^{-1}(\boldsymbol{\xi})) \leq 0} \varphi_M(\boldsymbol{\xi}) d\boldsymbol{\xi} = \int_{G(\boldsymbol{\xi}) \leq 0} \varphi_M(\boldsymbol{\xi}) d\xi_1 \dots d\xi_M \quad (3)$$

où  $G(\boldsymbol{\xi}) = g(T^{-1}(\boldsymbol{\xi}))$  et  $\varphi_n$  est la densité de probabilité multinormale centrée réduite de dimension  $n$ . Cette densité de probabilité est maximale à l'origine et décroît exponentiellement avec  $\|\boldsymbol{\xi}^2\|$ . Ainsi, les points contribuant le plus à l'intégrale (3) sont donc ceux appartenant au domaine de défaillance  $D_f$  qui sont les plus proches de l'origine. L'étape suivante de la méthode FORM est donc de déterminer le *point de conception*  $P^*$ , qui est le point du domaine de défaillance le plus proche de l'origine. Ce point est solution du problème d'optimisation suivant :

$$P^* = \boldsymbol{\xi}^* = \arg \min_{\boldsymbol{\xi} \in D_f} \left\{ f(\boldsymbol{\xi}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\xi}^2 : G(\boldsymbol{\xi}) \leq 0 \right\} \quad (4)$$

Le problème d'optimisation (4) peut être résolu par différents algorithmes tels que l'algorithme *improved Hasofer-Lind-Rackwitz-Fiessler* (iHLRF) qui est détaillé dans [4]. Une fois  $\boldsymbol{\xi}^*$  déterminé, l'*indice de fiabilité*  $\beta$  est défini comme :

$$\beta = \text{sign}(G(\mathbf{0})) \cdot \|\boldsymbol{\xi}^*\|. \quad (5)$$

$\beta$  représente la distance du point de conception  $\boldsymbol{\xi}^*$  à l'origine de l'espace gaussien standard où  $\text{sign}(G(\mathbf{0}))$  est positif (resp. négatif) lorsque  $\mathbf{0}$  est dans le domaine de sûreté (resp. domaine de défaillance).

L'étape suivante de la méthode FORM consiste à effectuer un développement en série de Taylor de la fonction d'état-limite  $G$  d'ordre 1 au point de conception  $\boldsymbol{\xi}^*$ . Géométriquement, cela revient à remplacer la surface d'état-limite  $\partial D$  par un hyperplan tangent au point  $\boldsymbol{\xi}^*$  (voir Fig. 2) et le domaine de défaillance  $D_f$  par le demi-espace correspondant. Ainsi, l'approximation au premier ordre de la probabilité de défaillance est [3]:

$$P_f = \int_{G(\boldsymbol{\xi}) \leq 0} \varphi_M(\boldsymbol{\xi}) d\boldsymbol{\xi} \approx \int_{\text{hyp}(\boldsymbol{\xi}^*)} \varphi_M(\boldsymbol{\xi}) d\xi_1 \dots d\xi_M. \quad (6)$$

Comme les variables aléatoires gaussiennes centrées réduites  $\{\xi_i, i = 1, \dots, M\}$ , sont indépendantes, il est possible de démontrer que l'intégrale de la relation (6) est donnée par :

$$P_f \approx P_{f,\text{FORM}} = \Phi(-\beta) \quad (7)$$

où  $\Phi$  est la fonction de répartition d'une distribution gaussienne centrée réduite unidimensionnelle.

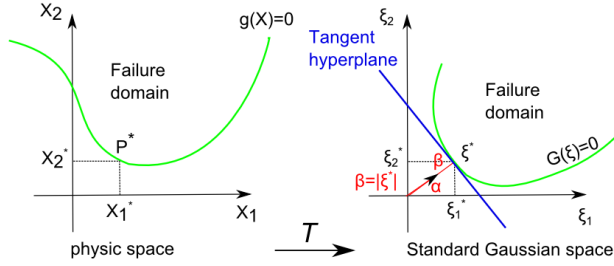


Fig. 2. Méthode d'approximation FORM.

Cependant, il peut arriver que l'approximation du premier ordre effectué par FORM ne soit pas suffisamment précise. Ainsi, il a été développé une méthode d'approximation SORM-courvature fitting [2] permettant d'approcher la surface d'état-limite par une surface quadratique. Le principe de la méthode repose sur le calcul de la matrice hessienne de la fonction d'état-limite au point de conception  $\xi^*$ . Le calcul de la probabilité de défaillance est ensuite effectué en intégrant sur le domaine de défaillance délimité par l'hyper-surface d'ordre 2 obtenue au point de conception  $\xi^*$ . Une version permettant de calculer  $P_{f,SORM}$  a été proposée par [5] :

$$P_f \approx P_{f,SORM} = \Phi(-\beta) \prod_{j=1}^{M-1} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\varphi(\beta)}{\Phi(-\beta)} \kappa_j}} \quad (8)$$

où  $\{\kappa_j, j = 1, \dots, M-1\}$  sont les courbures principales de l'hyper-surface autour du point de conception  $\xi^*$  et  $\varphi$  est la fonction de densité d'une distribution gaussienne centrée réduite unidimensionnelle.

### III.2. Importance Sampling

Les méthodes FORM-SORM présentées précédemment fournissent une approximation de la probabilité de défaillance à un coût de calcul relativement faible par rapport à la méthode de simulation par Monte Carlo (MC). Néanmoins, lorsque le problème physique étudié est complexe, différents inconvénients peuvent être rencontrés :

- le point de conception  $\xi^*$  obtenu solution du problème d'optimisation (4) peut être mal identifié (i.e.  $\xi^*$  est un minimum local et non global) ;
- la qualité de l'approximation de la probabilité de défaillance  $P_f$  peut ne pas être acceptable.

Pour faire face à ces problèmes, une approche complémentaire appelée *Importance Sampling* (IS) a été développée [6]. Cette technique s'appuie sur le fait que comme le poids de la probabilité de défaillance est principalement localisé autour du point de conception  $\xi^*$ , il est plus efficace de concentrer l'échantillonnage autour de ce point (voir Fig. 3) en prenant une fonction de

densité d'importance  $\psi$  bien choisie [2]. Une solution est de choisir  $\psi$  comme une fonction de densité gaussienne centrée au point de conception  $\xi^*$  et réduite de dimension  $M$  tel que :

$$\psi(\xi) = \varphi_M(\xi - \xi^*) = \frac{1}{(2\pi)^{M/2}} \exp\left(-\frac{\|\xi - \xi^*\|^2}{2}\right). \quad (9)$$

La probabilité de défaillance  $P_f$  est alors donnée par :

$$\begin{aligned} P_f &= \int_{\mathbb{R}^M} 1_{D_f} \varphi_M(\xi) d\xi \\ &= \int_{\mathbb{R}^M} 1_{D_f} \frac{\varphi_M(\xi)}{\psi(\xi)} \psi(\xi) d\xi_1 \dots d\xi_M \end{aligned} \quad (10)$$

où  $1_{D_f}$  est la fonction indicatrice du domaine de défaillance (i.e. la fonction qui vaut 1 dans le domaine de défaillance et 0 dans le domaine de sûreté). La relation (10) peut être réécrite comme l'espérance  $E_\psi[\cdot]$  par rapport à la fonction de densité d'importance  $\psi$  :

$$P_f = E_\psi \left[ 1_{D_f} \frac{\varphi_M(\xi)}{\psi(\xi)} \right]. \quad (11)$$

Finalement, un estimateur de la probabilité de défaillance est alors donné par la simulation de Monte Carlo (voir Fig. 3):

$$P_{f,IS} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N 1_{D_f}^{(k)} \frac{\varphi_M(\xi^{(k)})}{\psi(\xi^{(k)})} \quad (12)$$

où l'échantillon  $\{\xi^{(k)}, k = 1, \dots, N\}$  est distribué selon la fonction de densité d'importance  $\psi$ . En d'autres termes, cela revient à effectuer des tirages autour du point de conception  $\xi^*$ , et d'approximer la probabilité de défaillance par le nombre d'évaluation de la fonction d'état-limite qui sont dans le domaine de défaillance (voir les points orange sur la Fig.3) divisé par le nombre total d'évaluation de la fonction d'état-limite. Un estimateur de la variance de  $P_f$  est également donné par :

$$\begin{aligned} \widehat{\text{var}}(P_{f,IS}) &\approx \frac{1}{N-1} \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left( 1_{D_f}^{(k)} \left( \frac{\varphi_M(\xi^{(k)})}{\psi(\xi^{(k)})} \right)^2 \right) \right. \\ &\quad \left. - P_{f,IS}^2 \right). \end{aligned} \quad (13)$$

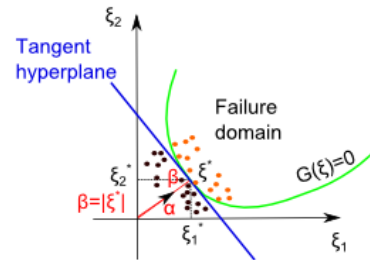


Fig. 3. Méthode de simulation par tirages centrés en  $\xi^*$ .

#### IV. ESTIMATION DE LA PROBABILITE DE DEFAILLANCE POUR UN CALCUL D'INTERFERENCES

Les résultats fournis dans cette partie ont été obtenus par la toolbox FERUM4.1 [7] utilisable dans MATLAB® couplée avec un code de calcul sur la théorie des lignes de transmission résolvant les équations BLT (code interne IETR).

##### IV.1. Etude sur la bande de fréquence [400 - 600 kHz]

Une représentation préliminaire du courant induit  $I_2(Lg)$  en fonction des aléas charges, hauteurs et longueur des fils conducteurs est donnée par 100 tirages de Monte Carlo (MC) sur la bande de fréquence  $\Delta_f = [400 - 600 \text{ kHz}]$  (voir Fig. 4). On observe sur la Fig. 4 que le courant induit  $I_2(Lg)$  augmente linéairement dans la bande de fréquence  $\Delta_f = [400 - 600 \text{ kHz}]$ . Dans cette gamme de fréquence pour laquelle la longueur d'onde est bien plus grande que la longueur de la ligne de transmission le couplage s'interprète effectivement aisément comme proportionnel à la dérivée temporelle des signaux.

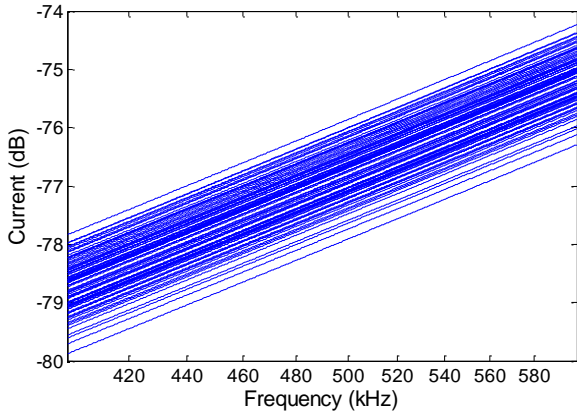


Fig. 4. Evolution du courant induit  $I_2(Lg)$  en fonction de la bande de fréquence  $\Delta_f = [400 - 600 \text{ kHz}]$  obtenu par 100 tirages de Monte Carlo avec des aléas uniformes sur : les résistances  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , les hauteurs  $h_1, h_2$  et la longueur des fils conducteurs  $Lg$ .

On propose maintenant de calculer par FORM et SORM (c.f. section III.1.) une probabilité de défaillance  $P_f$ , i.e. la probabilité que le maximum du courant induit  $I_2(Lg)$  évalué dans la bande de fréquence  $\Delta_f = [400 - 600 \text{ kHz}]$  dépasse une certaine valeur  $I_s = -74.5 \text{ dB}$  (seuil fixé arbitrairement). Les résultats obtenus par FORM et surtout SORM sont assez satisfaisants car il existe peu d'écart entre eux et ceux obtenus par 5000 tirages de Monte Carlo (MC, utilisée ici comme méthode de référence). Les résultats sont présentés dans la Table 1.

Table 1. Comparatif des méthodes de fiabilité sur la bande de fréquence  $\Delta_f = [400 - 600 \text{ kHz}]$

Méthodes utilisées Probabilité de défaillance	FORM	SORM	MC
$P_f = \mathbb{P}(\max_{\Delta_f} I_2(Lg) \geq -74.5)$	0.072	0.035	0.032 $\pm 8\%$
Nombre d'appels au code de calcul	208	35	5000

##### IV.2. Etude sur la bande de fréquence [5-10 MHz]

Nous allons maintenant effectuer la même étude que précédemment mais en zone de résonance (régime haute fréquence). Dans le but de montrer la variabilité beaucoup plus importante du courant induit  $I_2(Lg)$  en haute fréquence, une représentation de ce dernier est donnée sur la bande de fréquence  $\Delta_f = [5 - 10 \text{ MHz}]$  (voir Fig. 5). Fig. 5 montre que des phénomènes de résonance se produisent aux fréquences  $f_n$  telles que  $f_n = (2n + 1)c/4 Lg$ , où  $n \in \mathbb{N}$ ,  $Lg$  est la longueur de la ligne de transmission et  $c$  est la vitesse de la lumière. La première fréquence de résonance de la ligne est 7.5 MHz. On observe cependant un motif particulier de la courbe lié à la combinaison de couplages inductifs et capacitifs.

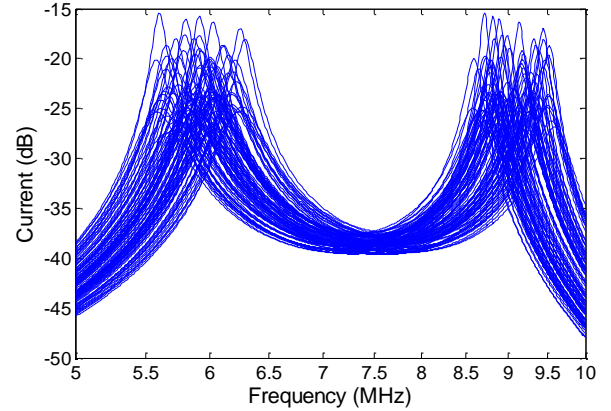


Fig. 5. Evolution du courant  $I_2(Lg)$  en fonction de la bande de fréquence  $[5 - 10 \text{ MHz}]$  obtenu par 100 tirages de Monte Carlo avec des aléas uniformes sur : les résistances  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , les hauteurs  $h_1, h_2$  et la longueur des fils conducteurs  $Lg$ .

Nous proposons également de calculer par FORM, SORM la probabilité de défaillance  $P_{fi}$  que le maximum du courant induit  $I_2(Lg)$  évalué dans les bandes passantes  $\Delta_{fi}, i = 1, \dots, 4$  (définies par  $\Delta_{f_1} = [5 - 6 \text{ MHz}]$ ,  $\Delta_{f_2} = [6 - 7 \text{ MHz}]$ ,  $\Delta_{f_3} = [8 - 9 \text{ MHz}]$ ,  $\Delta_{f_4} = [9 - 10 \text{ MHz}]$ ) excède un seuil  $I_s = -17.65 \text{ dB}$  (seuil fixé arbitrairement). Noter que l'étude ayant pour but de quantifier la probabilité d'excéder le seuil  $I_s = -17.65 \text{ dB}$  n'est pas effectuée dans la bande passante  $[7 - 8 \text{ MHz}]$  car les valeurs du courant induit  $I_2(Lg)$  sont trop faibles par rapport au seuil choisi. Les résultats obtenus par l'approximation FORM et SORM sont présentés dans

la Table 2. Nous remarquons par exemple un écart significatif entre les résultats fournis par FORM (*e.g.*  $P_{f_1, \text{FORM}} \approx 11\%$ ) et le résultat de référence obtenu par 5000 tirages de Monte Carlo ( $P_{f_1, \text{MC}} \approx 3\%$ ). Pour améliorer la précision des résultats, nous avons également effectué une approximation SORM fournissant une meilleure estimation de la probabilité de défaillance dans toutes les bandes passantes sauf dans la bande  $\Delta_{f_3}$  où l'erreur commise n'est pas acceptable ( $P_{f_3, \text{SORM}} \approx 0.5\%$  and  $P_{f_3, \text{MC}} \approx 2.4\%$ ). Nous remarquons donc que principalement FORM et quelquefois SORM peuvent présenter quelques limites concernant l'approximation du domaine de défaillance. Cela est dû à la surface d'état-limite qui possède une forme non-linéaire et trop irrégulière en zone de résonance. Afin de faire face à ces limites, l'approche par Importance Sampling (IS, *c.f.* section III.2.) est utilisée. Ainsi, nous constatons par exemple que dans la bande  $\Delta_{f_3}$  la probabilité de défaillance obtenue par IS avec 200 tirages est  $P_{f_3, \text{IS}} = 0.0267 \pm 23\%$ , ce qui est beaucoup plus proche du résultat de référence ( $P_{f_3, \text{MC}} \approx 2.4\%$ ). Les probabilités de défaillance  $P_{f_i}$ ,  $i = 1, \dots, 4$  calculées par les différentes méthodes de fiabilité sont données dans la Table 2. Les nombres  $n_i$  d'évaluation du code de calcul associés à chacune de ces probabilités de défaillance  $P_{f_i}$  sont présentés dans la Table 3.

Table 2. Comparatif des méthodes de fiabilité sur les différentes bandes passantes

Méthodes utilisées Probabilité de défaillance	FORM	SORM	IS	MC
$P_{f_1}$	0.1114	0.0385	0.0391 $\pm 16\%$	0.0314 $\pm 8\%$
$P_{f_2}$	0.0477	0.0391	0.0145 $\pm 28\%$	0.0230 $\pm 9\%$
$P_{f_3}$	0.0820	0.0056	0.0267 $\pm 23\%$	0.0242 $\pm 9\%$
$P_{f_4}$	0.1125	0.0433	0.0296 $\pm 16\%$	0.0300 $\pm 8\%$

Table 3. Coût de calcul des méthodes de fiabilité sur les différentes bandes passantes

Méthodes utilisées Nombre d'appels au code de calcul	FORM	SORM	IS	MC
$n_1$	110	35	200	5000
$n_2$	124	35	200	5000
$n_3$	376	35	200	5000
$n_4$	180	35	200	5000

## V. CONCLUSION

Dans cette communication, différentes méthodes de fiabilité ont été proposées pour quantifier la probabilité que le courant induit par diaphonie excède un seuil (*i.e.* une probabilité de défaillance  $P_f$ ) en prenant en compte des aléas sur les charges aux extrémités, les hauteurs et la longueur de ligne de transmission. Ces méthodes qui permettent de réduire le nombre d'évaluation du code de calcul par rapport à la méthode de simulation de Monte Carlo, ont fourni une estimation assez satisfaisante d'une probabilité de défaillance lorsque l'on s'intéresse à un problème simple. Les méthodes FORM et SORM estiment correctement  $P_f$  en régime basse fréquence lorsque les courants induits sont des combinaisons des variations de paramètres d'entrée. Par contre, ces méthodes classiques peuvent commettre des erreurs non négligeables en calculant  $P_f$  lorsque le problème est plus complexe comme en zone de résonance. Pour cette raison, nous avons eu recours à une méthode de simulation par tirages d'importance (Importance Sampling) plus efficace et plus adaptée face à ce type de problème. Pour résumer, il semble nécessaire de s'appuyer sur la comparaison et la combinaison des différentes méthodes pour établir un diagnostic plus fiable des résultats obtenus. Il est en effet probable qu'aucune méthode universelle n'apparaisse pour résoudre tous les problèmes de fiabilité [3].

Ces outils d'analyse de fiabilité permettent à l'ingénieur CEM d'estimer rapidement les risques d'un système électromagnétique à partir d'une information relativement vague sur les paramètres d'entrée tels que la position des câbles ou les impédances d'entrée.

Pour conclure, le choix de cette application repose sur le point de vue de l'ingénieur CEM possédant une information très modeste sur les paramètres d'entrée du système mais qui aimerait s'assurer que le courant induit  $I_2(Lg)$  n'engendre pas un dysfonctionnement de l'équipement électronique connecté en bout de ligne. En ce qui concerne le problème traité, la probabilité de défaillance du système a été définie comme la probabilité que le courant induit  $I_2(Lg)$  excède un seuil déterminé arbitrairement. Cependant, à l'extrémité du fil conducteur  $n^\circ 2$ , l'impédance  $R_4$  n'est que l'impédance d'entrée d'un équipement électronique inconnu. Cet équipement présente lui-même un niveau de susceptibilité idéalement représenté par sa propre fonction de densité de probabilité. Nos travaux futurs intégreront cette hypothèse.

## REMERCIEMENTS

Ces travaux de thèse sont soutenus par le CEA, DAM, Gramat dans le cadre d'études réalisées au profit de la DGA/UM NBC.

## REFERENCES

- [1] P. Bonnet, S. Girard, S. Lalléchère, F. Paladian et B. Pecqueux, *"Mise en oeuvre expérimentale de méthodes stochastiques sur un problème de C.E.M."*, CEM 2012.
- [2] M. Lemaire, *"Fiabilité des structures - Couplage mécano-fiabiliste statique"*, Hermès, 2005.
- [3] B. Sudret, *"Uncertainty propagation and sensitivity analysis in mechanical models - Contributions to structural reliability and stochastic spectral methods"*, Habilitation à diriger des recherches, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 2007.
- [4] Y. Zhang, and A. Der Kiureghian, *"Two improved algorithms for reliability analysis"*, in R. Rackwitz, G. Augusti, and A. Borri, editors, 6th IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems, Chapman & Hall, 1994.
- [5] M. Hohenbichler, S. Goldwitzer, W. Kruse, and R. Rackwitz, *"New light on first- and second- order reliability methods"*, Structural Safety, 4 :267-284, 1987.
- [6] R.E. Melchers, *"Radial importance sampling for structural reliability"*, J. Eng. Mech., 116(1):189-203, 1990.
- [7] J.-M. Bourinet, C. Mattrand, and V. Dubourg, *"A review of recent features and improvements added to FERUM software,"* in Proc. of the 10th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR 2009), Osaka, Japan, 2009.